Passieve verzwakkers

Passieve verzwakkers (attenuators) zijn uitsluitend met weerstanden samengestelde schakelingen die de grootte van een signaal tot een gewenste waarde verkleinen. In vrijwel ieder meetapparaat zit zo'n verzwakker.

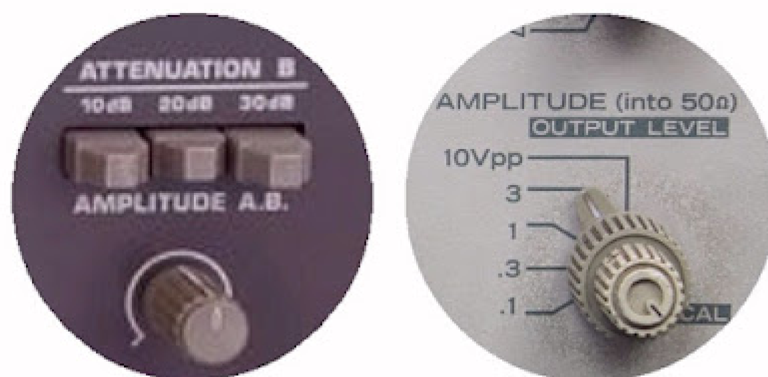
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 01-03-2022

Inleidende begrippen

Genereren of meten, verzwakkers zijn onmisbaar
Meetapparatuur is in grote lijnen in te delen in twee categorieën: apparaten die een signaal meten en apparaten die een signaal genereren. Het is noodzakelijk dat u een mogelijkheid hebt de grootte van het meetbereik of de grootte van het uitgangssignaal in te stellen. Dat kan met potentiometers en/of met schakelaars. In de onderstaande foto ziet u bijvoorbeeld links de uitgangsverzwakker van de sinusgenerator PM5109 en rechts deze van de F34 functie generator.
Uit deze foto kunt u een aantal conclusies trekken:

- Verzwakkingen worden in de praktijk zowel geijkt in V als in dB.
- Bij ijking in dB werkt men met veelvouden van 10 dB.
- Bij ijking in V werkt men met veelvouden van 3 V en/of 10 V.

Bij sommige apparaten zijn de schakelaar verzwakker en de potentiometer verzwakker gecombineerd in een dubbele bedieningsknop. Het zal duidelijk zijn dat deze laatste optie bij zelfbouw niet aan de orde is. Zo'n gecombineerde schakelaar/potentiometer is, voor zover wij weten, niet los te koop.



Twee passieve verzwakkers op meetapparatuur.
(© 2022 Jos Verstraten)

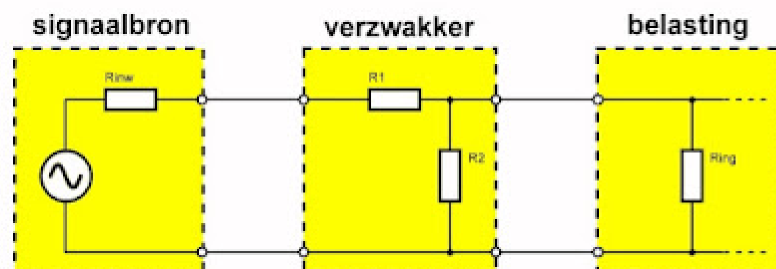
Zeer belangrijke schakelingen
Ondanks hun eenvoud zijn passieve verzwakkers zeer belangrijke en onmisbare schakelingen. Neem als voorbeeld zo'n goedkoop functiegenerator bouwpakketje dat een sinus genereert met een uitgangsspanning van 10 V. In de praktijk kunt u daar weinig mee. Met het uitgangssignaal moet u immers zowel een zeer gevoelige microfoonversterker met een signaal van 3 mV kunnen sturen als een eindversterker die 0,755 V nodig heeft. Zonder een goede verzwakker, samengesteld uit een draaischakelaar en een potentiometer, kunt u

die functiegenerator niet in de praktijk toepassen.

Iets over inwendige- en belastingsweerstanden

Een passieve verzwakker staat uiteraard niet op zichzelf, maar maakt onderdeel uit van een complexe schakeling, waarbij de verzwakker aan de ene kant is aangesloten op een signaalbron en aan de andere kant op een belasting. Zowel de bron als de belasting zijn geen ideale onderdelen. De bron heeft een niet te verwaarlozen inwendige weerstand R_{inw}, de belasting heeft een niet te verwaarlozen ingangsweerstand R_{ing}. Een en ander is voorgesteld in de onderstaande figuur.

De weerstandsdeler R1/R2 zorgt voor de gewenste verzwakking. Stel dat u de helft van de ingangsspanning op de uitgang wilt terugvinden. Als u de verzwakker los staand beschouwt is het voldoende beide weerstanden R1 en R2 even groot te maken. Over beide weerstanden valt dan een identieke spanning, zodat u aan de uitgang van de verzwakker keurig de helft van de ingangsspanning terugvindt. Van die keurige spanningsverdeling blijft echter weinig over als u de verzwakker aansluit op de signaalbron en op de belasting. De weerstand R_{inw} staat in serie met de weerstand R1. De weerstand R_{ing} staat parallel over de weerstand R2. Er ontstaan dan als het ware twee nieuwe weerstanden in de spanningsdeler. R1 wordt groter, R2 wordt kleiner. De gewenste verzwakking tot de helft van de ingangsspanning wordt in de praktijk niet gerealiseerd.



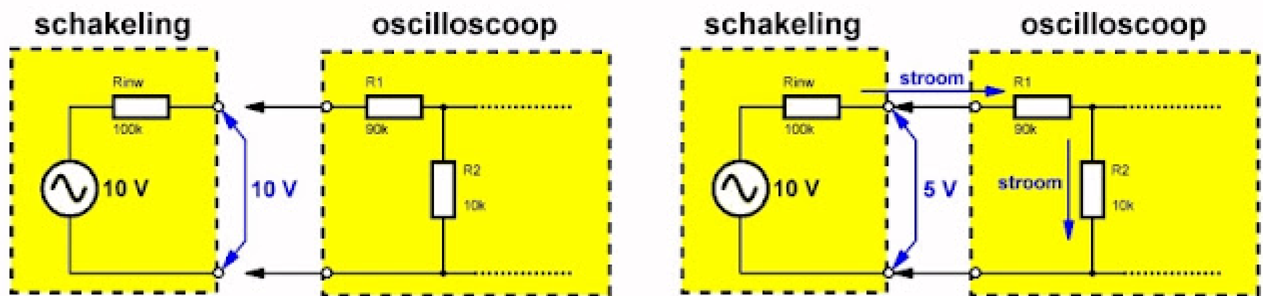
Een passieve verzwakker in een schakeling. (© 2022 Jos Verstraten)

De weerstandskeuze bij meetapparatuur

Als u een passieve verzwakker gebruikt om het meetbereik van een voltmeter of oscilloscoop uit te breiden moeten de weerstanden van de verzwakker zo groot mogelijk zijn. Dit wordt duidelijk aan de hand van de onderstaande figuur. Stel dat u de spanning op een punt van een schakeling wilt meten. Op dat punt staat een spanning van 10 V en dat punt heeft een inwendige weerstand R_{inw} van 100 kΩ. De ingangsverzwakker van het meetinstrument is symbolisch voorgesteld door de twee weerstanden R1 en R2. R1 heeft een waarde van 90 kΩ, R2 is gelijk aan 10 kΩ. Als u zo'n oscilloscoop aansluit op het punt van de schakeling ontstaat er een gesloten kring R_{inw}, R1 en R2. Er gaat dus een stroom door deze drie weerstanden vloeien. Omdat R_{inw} = R1 + R2 valt er over deze twee takken evenveel spanning, dus 5 V. Met deze oscilloscoop meet u dus een signaal met een spanning van slechts 5 V in plaats van de 10 V die zonder meting op dat punt staat!

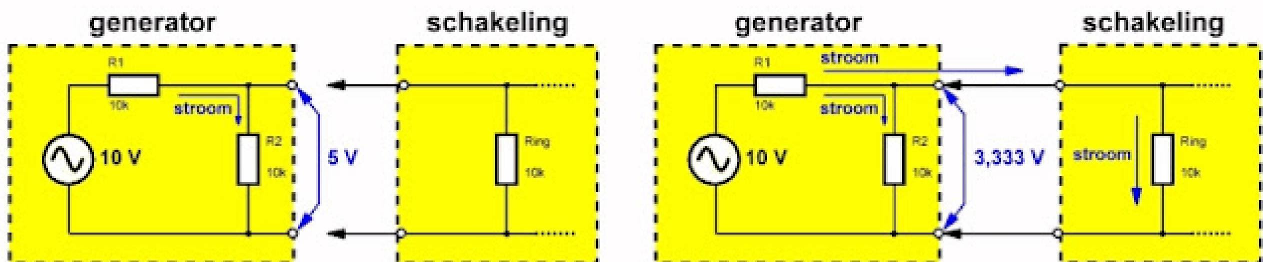
Conclusie: door het punt van de schakeling te belasten met deze ingangsverzwakker van uw oscilloscoop gaat u de schakeling op een onaanvaardbare manier verstoren, waardoor de schakeling misschien niet meer goed gaat werken en u in iedere geval volledig foutieve spanningen meet.

Vandaar dat de passieve verzwakker aan de ingang van een meetapparaat een zo hoog mogelijke weerstand moet hebben. Bij échte oscilloscopen is die waarde gestandaardiseerd op 1 MΩ. Bij digitale multimeters treft u 10 MΩ aan. Maar zelfs dán moet u nog steeds goed nadenken over wat het belasten van een punt van de schakeling met die weerstand voor gevolgen heeft voor de schakeling.



Een passieve verzwakker belast een schakeling. (© 2022 Jos Verstraten)

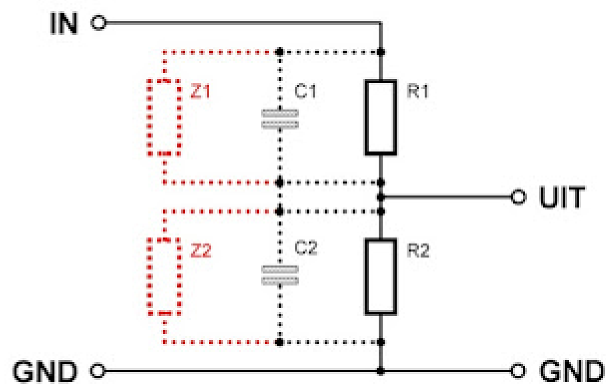
De weerstandskeuze bij signaalgeneratoren
Als u een generator afsluit met een passieve verzwakker waarmee u het uitgangssignaal instelt moeten de weerstanden van deze verzwakker zo klein mogelijk zijn. Dat wordt duidelijk als u de onderstaande tekening bekijkt. De generator zélf levert 10 V, maar u moet een uitgangssignaal van 5 V hebben. Dat kan door een verzwakker aan te sluiten op de generator die uit twee even grote weerstanden bestaat. R1 en R2 zijn beide 10 kΩ. Door die serieschakeling loopt een stroom die over beide weerstanden even grote spanningen genereert, dus 5 V. Dat is de uitgangsspanning van de onbelaste generator.
Wat gebeurt er nu als u het signaal van die generator aansluit op een schakeling? Die schakeling heeft een bepaalde ingangsweerstand R_{ing}. In dit voorbeeld is die 10 kΩ. Er gaat nu een tweede stroom door de weerstanden R1 en R_{ing} lopen. Hierdoor valt er meer spanning over de weerstand R1 en u kunt vrij eenvoudig berekenen dat daardoor de uitgangsspanning daalt tot 3,33 V.
Conclusie: de zonder belasting ingestelde uitgangsspanning van de generator gaat dalen als u iets aansluit op die generator. Ook nu worden uw metingen onbetrouwbaar.



Een schakeling belast een passieve verzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

Tegengestelde eisen
Conclusie van dit verhaal is dat u bij het berekenen van passieve verzwakkers goed rekening met houden met waarvoor u die verzwakker gaat gebruiken. Ingang meetapparaat? Weerstanden zo groot mogelijk! Uitgang signaalgenerator? Weerstanden zo klein mogelijk!

Iets over parasitaire capaciteiten
Een tweede factor waarmee u rekening moet houden bij het ontwerpen van passieve verzwakkers is de invloed van parasitaire capaciteiten. Dat probleem speelt alleen als u de verzwakker gebruikt in schakelingen waarin wisselspanningen aanwezig zijn. Een echte weerstand, die u in een schakeling soldeert, heeft niet alleen een bepaalde weerstandswaarde maar ook een bepaalde capaciteit die parallel aan de weerstand staat. Dat noemt men de '*parasitaire capaciteit*' van de weerstand. Als u deze onzichtbare onderdelen in het schema van een verzwakker opneemt ontstaat het onderstaande schema. U weet dat een condensator een bepaalde impedantie Z heeft, een wisselspanningsweerstand waarvan de waarde afhankelijk is van de frequentie. In het schema hebben wij die symbolisch en in het rood ingetekend. Voor gelijkspanning is die impedantie Z oneindig groot. De condensatoren spelen dan niet mee. De waarde van Z neemt echter af naarmate de frequentie van het signaal over de weerstand groter wordt. Dat betekent dat de verzwakking van uw verzwakker niet meer constant is, maar afhankelijk wordt van de frequentie van het signaal dat u aan de verzwakker aanlegt.



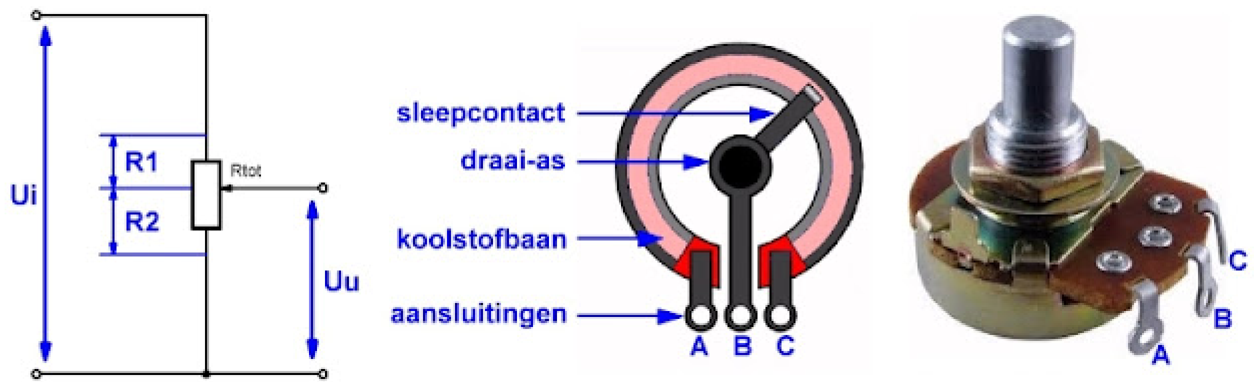
Parasitaire capaciteiten in een verzwakker.
(© 2022 Jos Verstraten)

Frequentie compensatie
Het zal duidelijk zijn dat de invloed van de impedanties van de condensatoren minder wordt als u de waarde van de weerstanden R1 en R2 zo klein mogelijk maakt. Maar als u de verzwakker toepast in de ingangskring van een meetapparaat moeten die weerstanden zo groot mogelijk zijn. Dat probleem kan worden opgelost door over de weerstanden van de verzwakker échte condensatoren te schakelen die veel groter zijn dan de parasitaire capaciteiten van de weerstanden. Deze moet u zó berekenen (of afregelen) dat zij wisselspanningssignalen in dezelfde mate verzwakken als de weerstanden dat doen. Dan neemt weliswaar de totale weerstand van de verzwakker af als de signaalfrequentie stijgt, maar blijft de verzwakkingsfactor zo constant mogelijk.

Soorten passieve verzwakkers
Er bestaan diverse manieren om een verzwakker samen te stellen. In de volgende paragrafen gaan wij de onderstaande typen bespreken:
- De potentiometer
- De L-pad verzwakker
- De decade stappenverzwakker
- De 1/3/10 stappenverzwakker
- De ladder stappenverzwakker
- De shunt stappenverzwakker
- De T-pad verzwakker
- De π-pad verzwakker

De potentiometer als passieve verzwakker

Fijnregeling op een stappenverzwakker
In de meeste gevallen wordt een potentiometer gebruikt als fijnregeling voor het instellen van de uitgangsspanning van een generator. Eerst kiest u met een draaischakelaar het bereik, bijvoorbeeld van 0 V tot 1 V. Nadien gebruikt u de potentiometer om de uitgangsspanning in dit bereik in te stellen op de gewenste waarde.
De potentiometer is de meest eenvoudige vorm van een verzwakker. Zoals uit onderstaande figuur blijkt, is een potentiometer niets anders dan een serieschakeling van twee weerstanden R1 en R2, waarbij de loper is verbonden met het knooppunt van beide weerstanden. Door het verdraaien van de loper wordt de verhouding tussen beide deelweerstanden continu veranderd. Een potentiometer is dus een verzwakker, waarbij u de deelverhouding continu kunt instellen tussen 1 en 0.

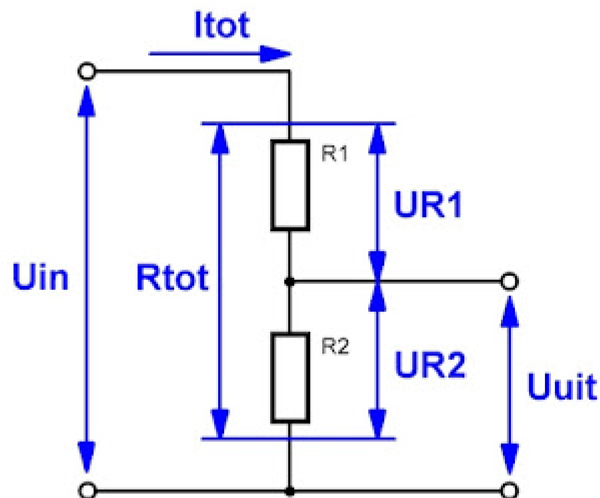


Een potentiometer als verzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

De L-pad verzwakker

Een potentiometer met 'bevroren' loper
Deze verzwakker is technisch bekeken precies hetzelfde als een potentiometer. Het verschil is dat de deelverhouding vast is ingesteld op een bepaalde factor. Deze factor wordt bepaald door de onderlinge verhouding tussen de twee weerstanden R1 en R2.

Het berekenen van de weerstanden
Stel dat u een spanning U_{in} van 10 V ter beschikking hebt, maar op een bepaald punt behoefte hebt aan een spanning U_{uit} van 4 V. Door een bepaalde weerstandsverhouding te kiezen zal op het knooppunt tussen beide weerstanden de gewenste spanning van 4 V ontstaan. Hoe u een dergelijke spanningsdeler moet berekenen volgt uit de onderstaande figuur en de wet van Ohm.



Een L-pad verzwakker heeft een vaste deelverhouding.
(© 2022 Jos Verstraten)

Door de twee weerstanden vloeit een stroom I_{tot}.
De spanning over de weerstand R2 is gelijk aan:
$U_{R2} = R2 \cdot I_{tot}$
De stroom door de kring wordt bepaald door:
$I_{tot} = U_{in} / R_{tot}$
Als u deze waarde in de vorige formule invult, ontstaat:
$U_{R2} = R2 \cdot [U_{in} / R_{tot}]$
[/ R_{tot}] kunt u naar links verplaatsen als [• R_{tot}]:
$U_{R2} \cdot R_{tot} = R2 \cdot U_{in}$
Of:

$R2 = [U_{R2} \cdot R_{tot}] / U_{in}$
De waarden van U_{in} en U_{R2} zijn bekend, namelijk 10 V en 4 V. Het volstaat nu een waarde voor de totale weerstand R_{tot} te kiezen, bijvoorbeeld 10 kΩ om onmiddellijk de waarde van R2 te kunnen berekenen. In dit geval is deze weerstand gelijk aan 4 kΩ, zodat de waarde van R1 gelijk moet zijn aan 6 kΩ.

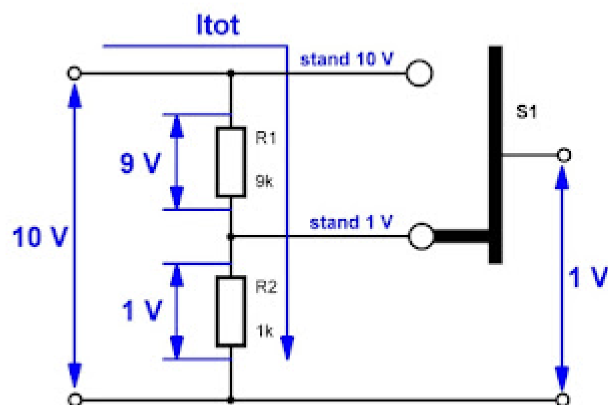
Belangrijke opmerking
In deze berekening wordt de L-pad verzwakker los bekeken van zijn omgeving. In de praktijk hebt u natuurlijk te maken met het feit dat de ingangsspanning ergens vandaan komt en de uitgangsspanning ergens naar toe gaat. U moet dus rekening houden met de reeds genoemde weerstanden R_{inw} en R_{ing} die in de inleiding van dit artikel zijn besproken. Omdat het maar de vraag is of u de exacte waarde van die twee weerstanden kent zal het er in de praktijk op neer komen dat u de waarden van de weerstanden R1 en R2 experimenteel moet gaan bepalen. Hierbij kunnen de berekende waarden uiteraard wel als een richtlijn dienen.

De decade stappenverzwakker

Een factor tien per stap
Sommige generatoren hebben een stappenverzwakker die decadisch werkt. Dat wil zeggen dat bij iedere omschakeling met één stap de uitgangsspanning toeneemt of afneemt met een factor tien. Zo'n functiegenerator werkt bijvoorbeeld met een vier stappen decadische stappenverzwakker:
- Stap 1: 0 V ~ 10 V
- Stap 2: 0 V ~ 1 V
- Stap 3: 0 V ~ 100 mV
- Stap 4: 0 V ~ 10 mV

Met deze verzwakker én een potentiometer kunt u zowel de 3 mV voor de microfoonversterker als de 0,755 V voor de eindversterker nauwkeurig instellen.

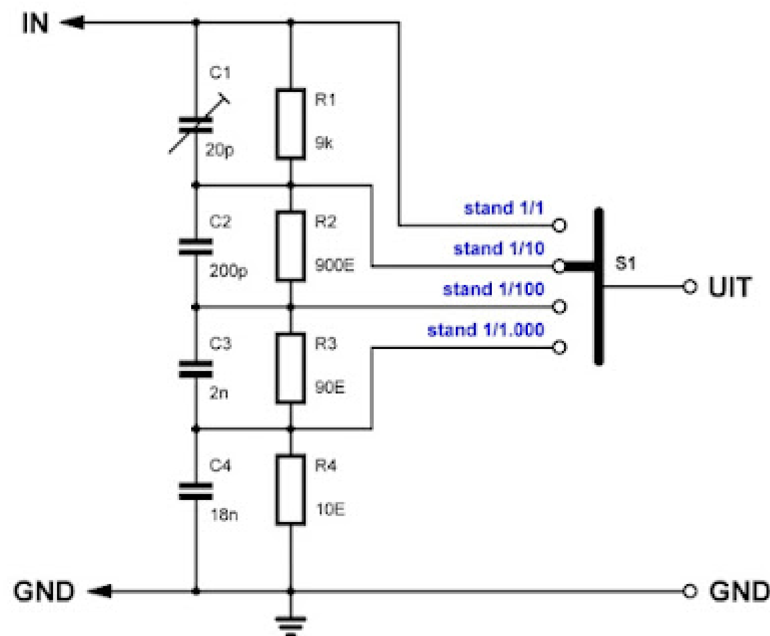
Een twee-standen decade verzwakker
In het onderstaande voorbeeld is het schema van de R1/R2 verzwakker omgewerkt tot een twee standen decade verzwakker. Stel dat aan deze schakeling een spanning van 10 V wordt aangeboden. In de ene stand [1] moet de uitgangsspanning aan die waarde gelijk zijn, in de tweede stand [2] moet de uitgangsspanning gelijk worden aan 1 V. Met de gegeven formule kunt u gemakkelijk berekenen dat, als de totale weerstand gelijk is aan 10 kΩ, de deelweerstanden R1 en R2 gelijk moeten zijn aan respectievelijk 9 kΩ en 1 kΩ.



Een decadische verzwakker met twee standen.
(© 2022 Jos Verstraten)

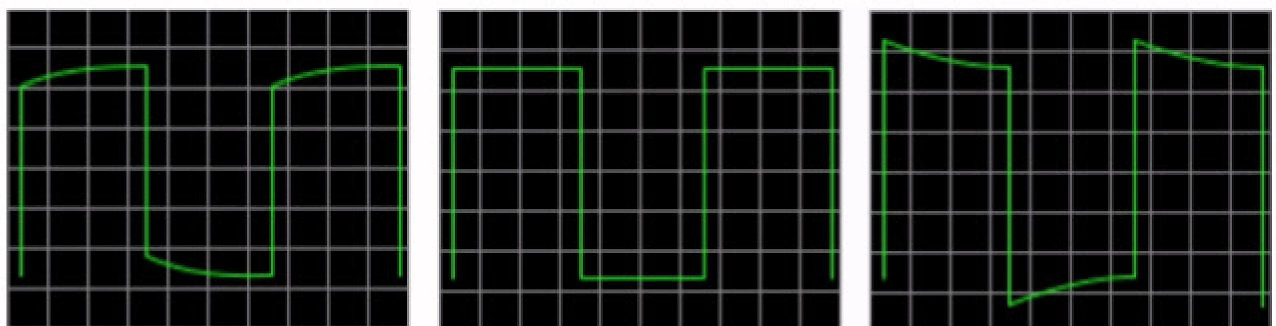
Het schema van een praktisch bruikbare decade verzwakker
In de onderstaande figuur is het schema getekend van een praktisch bruikbare vier-standen stappenverzwakker volgens het decade principe. Deze schakeling kunt u bijvoorbeeld

opnemen als uitgang van een van de vele uiterst goedkope functiegenerator kitjes die u in China voor soms minder dan tien euro kunt bestellen maar die alleen een potentiometertje hebben om de grootte van het uitgangssignaal in te stellen. De vier weerstanden zorgen voor een verzwakking tot respectievelijk 1/1, 1/10, 1/100 en 1/1.000 van de grootte van het ingangssignaal.
De condensatoren die over de weerstanden zijn geschakeld zorgen voor de frequentie compensatie van de schakeling. De kleinste capaciteit moet parallel aan de grootste weerstand staan. Omdat bij die kleinste waarde van 20 pF de parasitaire capaciteit van de weerstand een rol speelt en deze niet bekend is, moet u voor deze condensator een trimmertje toepassen.
Noteer dat ook deze schakeling alleen maar is geijkt als de uitgang wordt aangesloten op een schakeling waarvan de R_{ing} vele malen hoger is dan de weerstanden van de stappenverzwakker.



Een praktisch bruikbare decade verzwakker met vier standen.
(© 2022 Jos Verstraten)

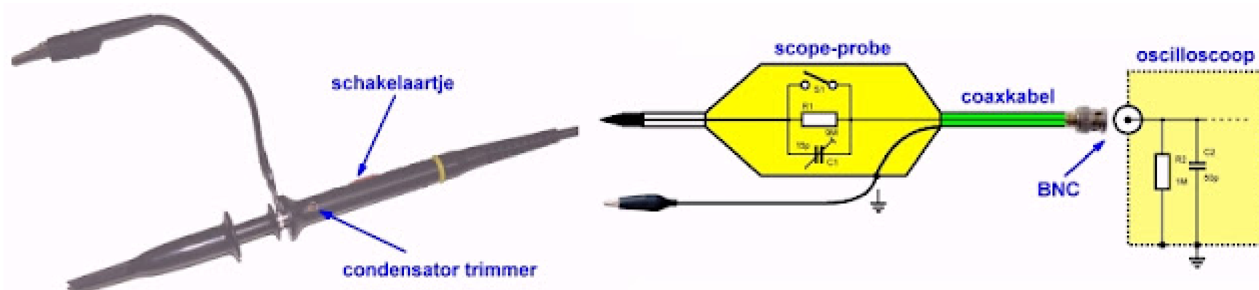
Het afregelen van de trimmer
Om de trimmer af te regelen moet u de verzwakker voeden met een 1 kHz blokgolf. Zet de schakelaar op '*stand 1/10*' en sluit de uitgang aan op een oscilloscoop. Gebruik een kleine niet-metalen schroevendraaier om de stelschroef in de trimmer te verdraaien, tot het scoopscherm een blokgolf met vlakke toppen toont. In de onderstaande figuur zijn de scope-beelden gegeven die ontstaan bij een ondergecompenseerde verzwakker, een correct gecompenseerde verzwakker en overgecompenseerde verzwakker.



Signalen op de uitgang bij een ondergecompenseerde, correct gecompenseerde en overgecompenseerde verzwakker. (© TiePie)

Een praktisch voorbeeld van een decade verzwakker
Een praktisch voorbeeld van een gecompenseerde decade verzwakker met twee standen is

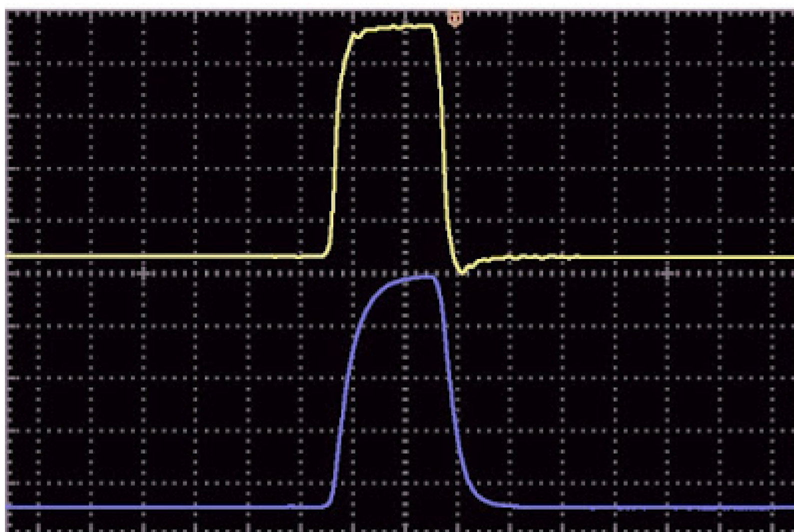
de standaard oscilloscoop probe, waarvan de onderstaande figuur een foto toont. Met een schuifschakelaartje in het handvat schakelt u om tussen 1/1 en 1/10. In de eerste stand wordt het te meten signaal onverzwakt doorgelaten, in de tweede stand wordt dit tien keer verzwakt. In het handvat zit achter een klein gaatje het schroefje van de trimmer waarmee u de verzwakker op de beschreven manier kunt afregelen. Vrijwel iedere oscilloscoop heeft daarvoor een speciale uitgang waarop een mooie blokvormige spanning staat met een frequentie van 1 kHz.



Een oscilloscoop probe met ingebouwde gecompenseerde verzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

Het voordeel van het gebruik van een 1/10 scope probe

In de probe zit een weerstand van exact 9 MΩ die samen met de ingangsweerstand van de oscilloscoop van 1 MΩ de gewenste 1/10 spanningsdeler vormt. Het grote voordeel van het gebruiken van de 1/10 stand is niet op de eerste plaats de spanningsverzwakking, maar het verhogen van de ingangsweerstand van uw oscilloscoop tot 10 MΩ. Hierdoor wordt de slechte invloed van de capaciteit van de coaxkabel van de probe vrijwel volledig uitgeschakeld. Het punt waarop u meet wordt dan veel minder capacitief belast en de getrouwde weergave van HF-signalen en snelle pulsen wordt bevorderd.
Om u een idee te geven hoeveel verschil zo'n passieve verzwakker kan uitmaken ziet u in het onderstaande screenshot een steile puls met een breedte van 100 ns weergegeven met twee identieke scope-probes. De ene (gele trace) staat in de 1/10 stand, de tweede (blauwe trace) in de 1/1 stand.



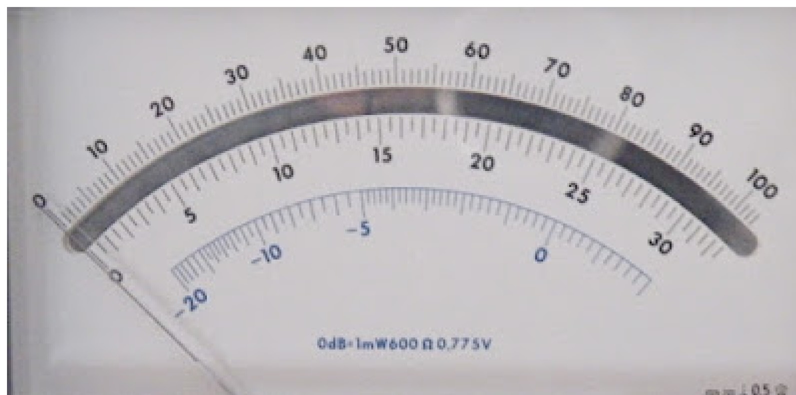
Een identieke puls weergegeven in de 1/10 stand en in de 1/1 stand. (© 2022 Jos Verstraten)

De 1/3/10 stappenverzwakker

Overgenomen van de analoge meters

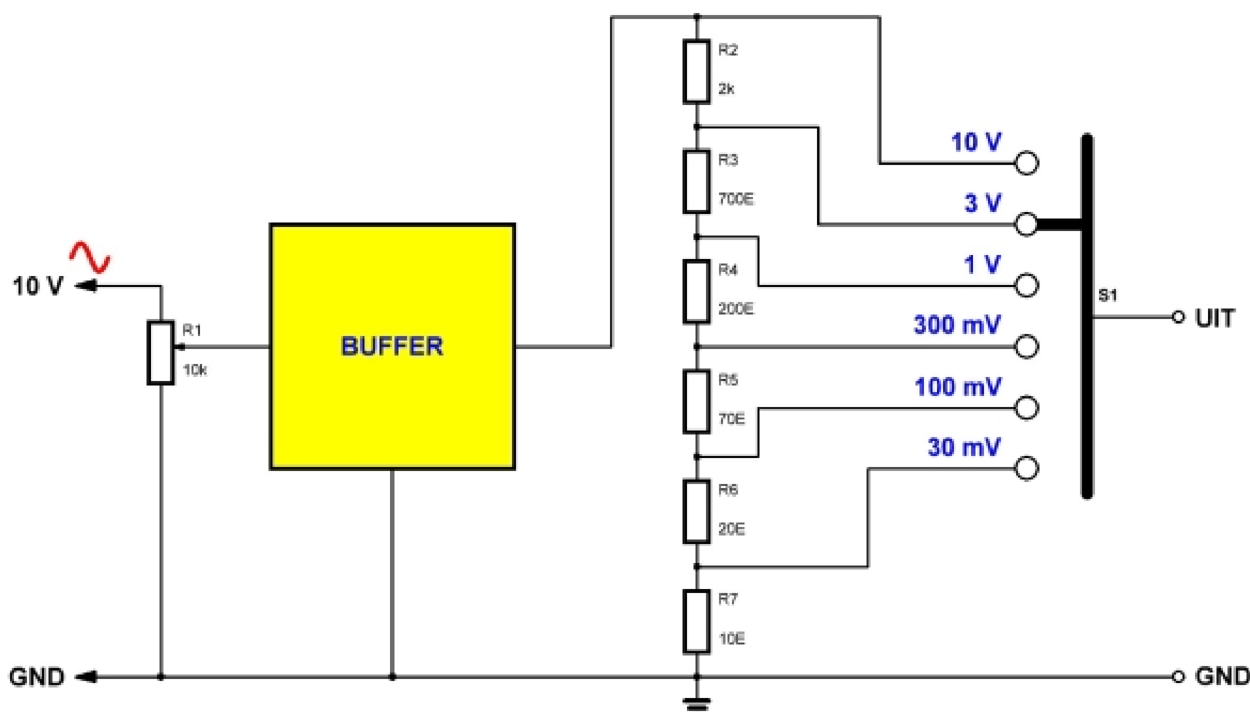
Analoge voltmeters uit de vorige eeuw hebben twee schalen, een tot 3,0 V en een tot 10,0 V. Die spanningen komen niet precies overeen met de volle schaal waarden, zie de

onderstaande foto. Dat heeft iets te maken met het feit dat die meters ook een dB-schaal hebben en dat het overschakelen van het bereik van 3 V naar het bereik van 10 V overeen komt met een dB-verzwakking van 10 dB. Vandaar dat u vaak bij sinusgeneratoren een verzwakker terugvindt die ook met deze maximale bereiken werkt: 10 V ~ 3 V ~ 1 V ~ 300 mV ~ 100 mV ~ 30 mV ~ 10 mV. Als u dan van het ene naar het vorige of volgende bereik omschakelt wordt het uitgangssignaal van de generator met 10 dB verzwakt of versterkt.



De schaalindeling van een analoge mV-meter.
(© 2022 Jos Verstraten)

Een praktische schakeling
In de onderstaande figuur is het schema getekend van een praktische 1/3/10 stappenverzwakker die u bijvoorbeeld achter een goedkope functiegenerator kunt schakelen. De weerstand R1 is de fijnregeling van de uitgangsspanning, de weerstanden R2 tot en met R7 zijn zo gekozen dat zij de gewenst verzwakking aan de uitgang leveren.
Weerstanden van 10 Ω, 20 Ω, 200 Ω en 2 kΩ zijn beschikbaar in de E96 reeks met een tolerantie van ±1 %. Weerstanden van 70 Ω en 700 Ω maakt u door twee weerstanden van 140 Ω respectievelijk 1,4 kΩ parallel te schakelen. Ook deze waarden zijn beschikbaar in de E96 reeks.

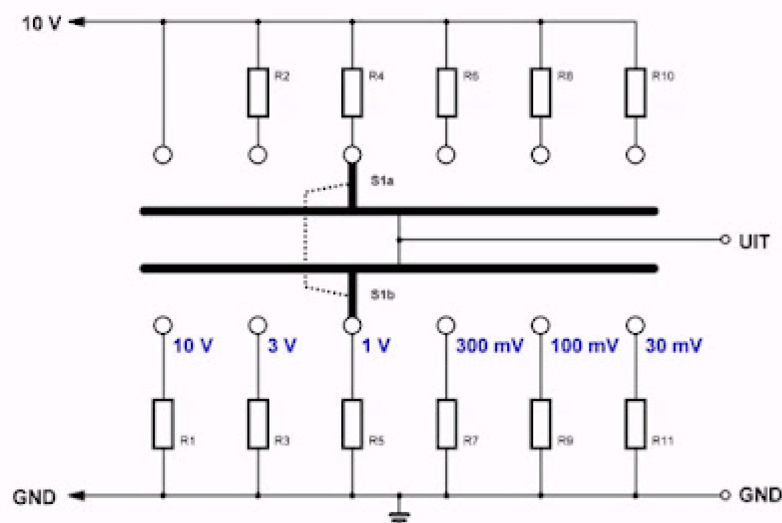


Een praktisch bruikbare 1/3/10 verzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

De ladder stappenverzwakker

Iedere stap zijn eigen deler
De decade stappenverzwakker en de 1/3/10 stappenverzwakker zijn in feite serieschakelingen van een aantal weerstanden. Nadeel van deze schakelingen is dat, bij een toevallig ongelukkige combinatie van individuele weerstandstoleranties, de onnauwkeurigheid van de verzwakkingen onaanvaardbaar groot kan worden. Bij de ladderverzwakker is dit nadeel niet aanwezig omdat voor iedere stap slechts twee weerstanden worden gebruikt. Nadeel is echter wél dat u voor deze stappenverzwakker een tweepolige schakelaar nodig hebt. Een draaischakelaar met twee polen en zes standen is echter standaard verkrijgbaar, dus een groot nadeel is dat in de praktijk niet.
Een tweede nadeel van de besproken verzwakkers is dat de uitgangsweerstand niet constant is, maar afhankelijk van de stand van de schakelaar. Een ladderverzwakker kunt u zo berekenen dat de uitgangsweerstand veel constanter blijft als u de schakelaar alle standen laat doorlopen.

Het schema van de ladderverzwakker
In de onderstaande figuur is het schema van een dergelijke verzwakker voorgesteld. Voor iedere stand van de tweepolige schakelaar wordt een andere L-pad verzwakker ingeschakeld. U kunt voor iedere stand van de schakelaar een andere verhouding tussen de twee weerstanden berekenen. Om de verzwakker heel nauwkeurig te maken kunt u een van de vaste weerstanden zelfs vervangen door de serieschakeling van een weerstand en een instelpotentiometer die een tien keer lagere waarde heeft. U kunt dan iedere stap van de verzwakker met een digitale voltmeter op de uitgang heel precies afregelen op de juiste verzwakking.
Uiteraard moet u de uitgang van de verzwakker wel afsluiten met een buffertrap met een hoge ingangsweerstand.



Het schema van een ladderverzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

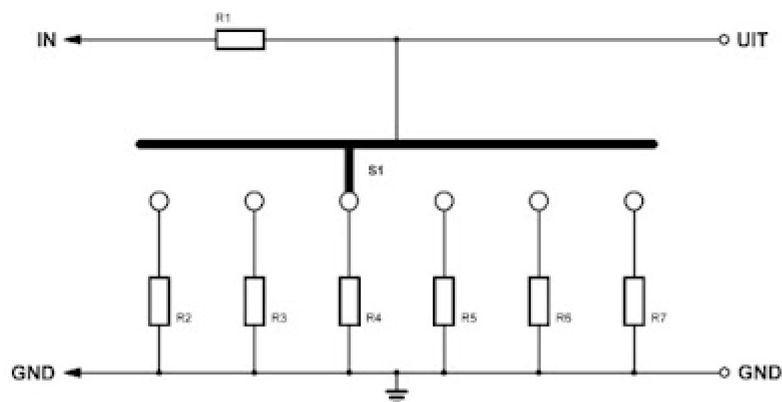
De ladderverzwakker in dB geijkt
Omdat u voor iedere sectie van de verzwakker individuele waarden kunt kiezen voor de twee weerstanden is de ladderverzwakker een ideale schakeling voor het opbouwen van een in dB's geijkte stappenverzwakker. In de onderstaande tabel worden de twee weerstandswaarden gegeven voor een aantal verzwakkerstanden tussen 1 dB en 20 dB. Uiteraard spelen hierbij de R_{ing} en de R_{inw} van de schakelingen waartussen de verzwakker staat een belangrijke rol. De in de tabel genoemde weerstandswaarden gelden uitsluitend als beide weerstanden gelijk zijn aan 50 Ω.

VERZWAKKING L-PAD (50 Ω)	R1	R2
1 dB	5,44 Ω	409,77 Ω
2 dB	10,28 Ω	193,11 Ω
3 dB	14,60 Ω	121,20 Ω
4 dB	18,45 Ω	85,49 Ω
6 dB	24,94 Ω	50,24 Ω
10 dB	34,19 Ω	23,12 Ω
20 dB	45,00 Ω	5,56 Ω

In dB geijkte ladderverzwakkers voor 50 Ω.
(© 2022 Jos Verstraten)

De shunt stappenverzwakker

Een ladderverzwakker met minder weerstanden
De shunt stappenverzwakker werkt in principe ook volgens het L-pad principe, maar de weerstand R1 van deze verzwakker is nu gemeenschappelijk voor alle stappen. Het schema is getekend in de onderstaande figuur. Ook nu kunt u iedere stap afzonderlijk ijken door de onderste weerstanden weer te vervangen door een vaste weerstand en een instelpotentiometertje.

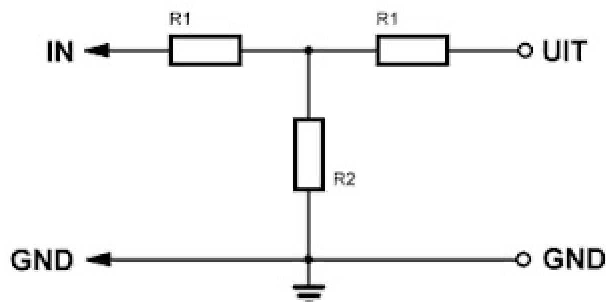


Het schema van een shunt stappenverzwakker.
(© 2022 Jos Verstraten)

De T-pad verzwakker

Drie weerstanden per stap
Zoals u ongetwijfeld vermoedt bestaat een T-verzwakker uit drie weerstanden die in een T-

vorm zijn geschakeld, zie de onderstaande figuur. Ook deze verzwakker moet zowel aan de ingang als aan de uitgang worden afgesloten met identieke weerstanden.
De voornaamste eigenschap van een T-pad verzwakker is dat de eigen ingangsweerstand R_{ing} en de eigen inwendige weerstand R_{inw} identiek zijn. De in- en de uitgang kunnen dus zonder problemen worden omgewisseld.



Het schema van een T-pad verzwakker.
(© 2022 Jos Verstraten)

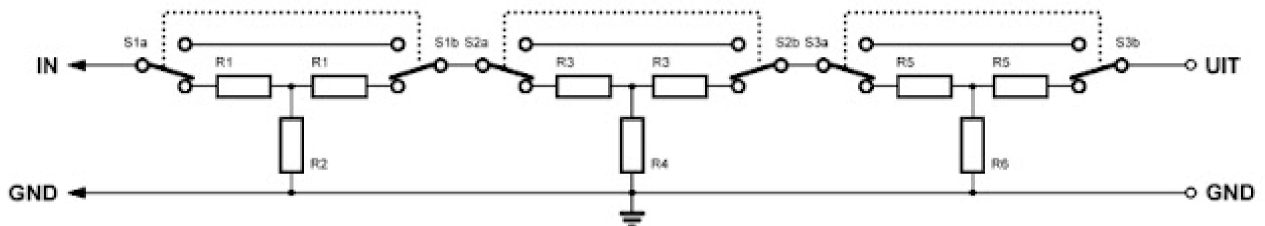
Een dB-verzwakker met T-pad's
Ook de T-pad verzwakker is ideaal om geijkte dB-verzwakkers te ontwerpen. In de onderstaande tabel zijn de weerstandswaarden voor R1 en R2 gegeven voor een T-pad die geschikt is voor 50 Ω in- en uitgangen.

VERZWAKKING T-PAD (50 Ω)	R1	R2
1 dB	2,88 Ω	433,34 Ω
2 dB	5,73 Ω	215,24 Ω
3 dB	8,55 Ω	141,93 Ω
4 dB	11,31 Ω	104,83 Ω
6 dB	16,61 Ω	66,93 Ω
10 dB	25,97 Ω	35,14 Ω
20 dB	40,91 Ω	10,10 Ω

In dB geijkte T-pad verzwakkers voor 50 Ω.
(© 2022 Jos Verstraten)

Ideaal voor HF-toepassingen
Bij hoogfrequent schakelingen speelt de impedantie van verbindingskabels een belangrijke rol. Die moet gelijk zijn aan de Z_{inw} en de Z_{ing} van de twee te verbinden schakelingen. Is dat niet het geval, dan ontstaan er zogenaamde signaalreflecties in de kabel die erg vervelende gevolgen kunnen hebben. In de meeste gevallen standaardiseert men alle impedanties in een HF-systeem op 50 Ω of op 75 Ω. Een T-pad verzwakker die is berekend voor 50 Ω kan zonder problemen worden opgenomen in de verbinding tussen twee 50 Ω schakelingen, omdat de schakeling de impedantie van de kabel niet beïnvloedt. Zowel de zender als de ontvanger '*zien*' nog steeds een kabel met een impedantie van 50 Ω.

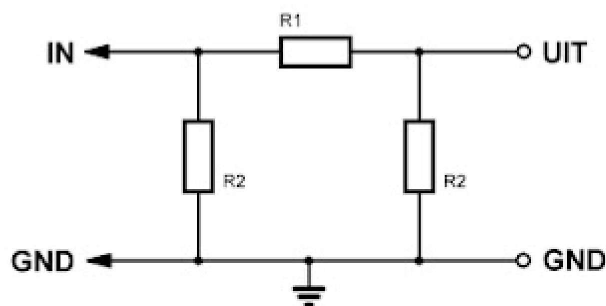
Cascadering van T-pad verzwakkers
Omdat een T-pad verzwakker de specifieke weerstand van het systeem waarin hij wordt opgenomen niet aantast kunt u zonder problemen diverse T-pad secties achter elkaar schakelen. Dat noemt men '*cascadering*'. Op deze manier ontstaat een verzwakker waarmee u een signaal een instelbaar aantal dB's kunt verzwakken. De totale verzwakking is gelijk aan de som van de dB's van de actieve secties. In de onderstaande figuur is bijvoorbeeld zo'n stappenverzwakker getekend die is samengesteld uit drie T-pad's. Stel dat u iedere sectie een verzwakking geeft van 10 dB. Door de drie tweepolige schakelaars in- of uit te schakelen kunt u de totale verzwakking instellen op 10 dB, 20 dB of 30 dB.



Een per 10 dB in te stellen stappenverzwakker. (© 2022 Jos Verstraten)

De π-pad verzwakker

Drie weerstanden in de vorm van de letter π
De π-pad verzwakker kunt u vergelijken met de T-pad verzwakker. Alleen zijn de drie weerstanden iets anders geschakeld. Ook deze verzwakker kan zonder problemen in een kabel met een specifieke impedantie worden opgenomen zonder dat deze grootheid wordt aangetast.



De typische vorm van een π-pad verzwakker.
(© 2022 Jos Verstraten)

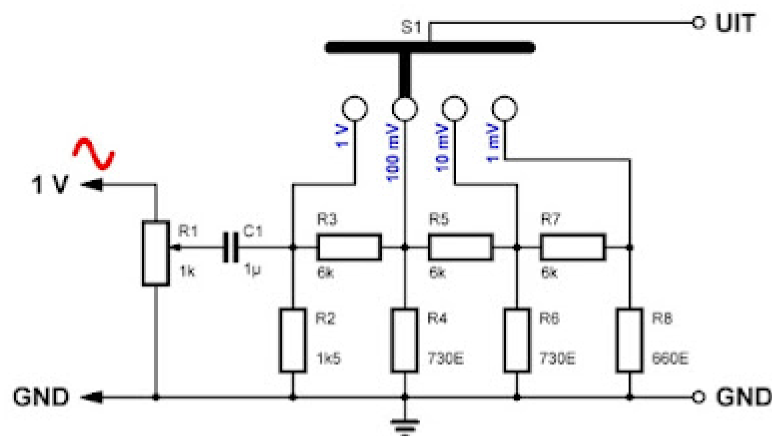
Een dB-verzwakker met π-pad's
Ook de π-pad verzwakker is ideaal om geijkte dB-verzwakkers te ontwerpen. In de onderstaande tabel zijn de weerstandswaarden voor R1 en R2 gegeven voor een π-pad die geschikt is voor 50 Ω in- en uitgangen.

VERZWAKKING π-PAD (50 Ω)	R1	R2
1 dB	5,77 Ω	869,55 Ω
2 dB	11,61 Ω	436,21 Ω
3 dB	17,61 Ω	292,40 Ω
4 dB	23,85 Ω	220,97 Ω
6 dB	37,35 Ω	150,48 Ω
10 dB	71,15 Ω	96,25 Ω
20 dB	247,50 Ω	61,11 Ω

In dB geijkte π-pad verzwakkers voor 50 Ω.
(© 2022 Jos Verstraten)

Cascadering van π-pad verzwakkers
π-pad verzwakkers kunt u uiteraard zonder problemen op de bij de T-pad verzwakker beschreven manier cascaderen.

Een π-pad verzwakker voor een sinusgenerator
Tot slot geven wij in de onderstaande figuur nog een voorbeeld van een π-pad stappenverzwakker die u kunt gebruiken voor het instellen van de amplitude van een laagfrequent sinusgenerator. De twee staande weerstanden R2 van de naast elkaar gelegen secties zijn hier vervangen door één weerstand met de waarde die gelijk is aan de waarde van de twee parallel geschakelde weerstanden. De uitgang van deze verzwakker moet u afsluiten met 600 Ω. Met de potentiometer R1 kunt u de uitgangsspanning binnen de vier bereiken instellen van nul tot de maximale waarde van het bereik.



Een π-pad verzwakker voor een LF sinusgenerator.
(© 2022 Jos Verstraten)